

KUINKA HÖYRYTAIVUTTAA PUUTA PIENVERSTAALLA?

Niilo Lehtonen
Empiirinen tutkimus-kurssin raportti
Muotoilun pääaine
Muotoilun laitos
Taiteiden ja suunnittelun korkeakoulu
Aalto-yliopisto
16.04.2021

TIIVISTELMÄ

Tutkimukseni tarkoituksena oli tutkia kuinka puuta pystyy taivuttamaan höyrytysmenetelmällä pienverstaan työkalustoa hyödyntäen. Lähtökohtana oli, että se pitäisi olla mahdollista, mutta koska taivutusprosessissa on monia onnistumiseen vaikuttavia tekijöitä, halusin tutkia niistä muutamien vaikutusta. Testattaviksi muuttujiksi valitsin puulajin, riman paksuuden ja höyrytys- ja kuivumisaikojen vaihteluiden vaikutukset.

Suuri osa tutkimusprosessia oli höyrytys- ja taivutuslaitteiston rakentaminen ja parantaminen. Ensimmäisen raakatestiversion jälkeen höyrytyslaitteiston sai toimivaksi vaihtamalla osan höyrytyskammion osista paremmin vettä kestäviksi. Muotit modifioin käyttötarkoitukseen sopiviksi jo valmiiksi löytyvistä kaarevista kappaleista. Lisäksi kokeilin höyrytaivutuksessa usein käytetyn taivutusvanteen sijaan mitoitukseltaan muunneltavaa taivutustaljaa.

Testatut puukappaleet taipuivat yllävänkin siististi. Jos muoteissa olisi ollut tiukempi kaari, olisi puun murtumispisteitä saatu paremmin kartoitettua. Myös suurempi määrä muotteja olisi lisännyt testauskapasiteettia ja nopeuttanut tulosten saamista. Tuloksista pystyttiin päättelemään, että kapeammat kappaleet taipuivat leveitä paremmin, mutta eivät säilyttäneet muotoaan yhtä hyvin. Leveät kappaleet taas pitivät muotonsa, mutta murtuivat helpommin.

SISÄLLYSLUETTELO

Tiivistelmä	2
Sisällysluettelo	3
1. Johdanto	4
2. Menetelmä	5
2.1. Tiedonkeruu	5
2.2. Taivutuslaitteiston rakentaminen	6
Vesihöyryn lähde	6
Höyrytyskammio	6
Taivutusmuotti	8
Kuivumismuotit	8
Taivutustalja	9
Valuma-astiat	9
Kustannukset	9
2.3. Turvallisuushuomiot	10
2.4. Tutkittavat muuttujat	10
Muuttujien raja	10
Ennakko oletukset	11
2.5. Taivutus käytännössä	12
3. Tulokset	13
3.1. Muuttujat ja niiden merkintä	13
3.2. Testijärjestys	14
3.3. Tulosten havainnointia	14
4. Johtopäätökset	16
4.1. Testattujen muuttujien vaihtelut	16
4.2. Laitteiston toiminta ja parannukset	16
4.3. Testatun menetelmän ja materiaalitulosten hyödyntäminen	17
5. Lähdeluettelo	18

1. JOHDANTO

Moni ihminen on jossakin vaiheessa elämäänsä kokeillut puun työstöä. Puun työstämiseen on lukemattomia eri menetelmiä, joista yleisimmät, kuten vuoleminen, sahaaminen ja höylääminen ovat materiaalia poistavia työstömenetelmiä. Kaarevuuden saaminen puukappaleeseen voidaan tehdä poistamalla materiaalia suuremmasta kappaleesta. Toinen tapa kaarevan muodon saamiseksi on tehdä muoto puuviiluista eli liimaamalla ohuita taipuisia puusuikaleita kerroksittain kaarevaa muottia vasten. Kolmas keino puun taivuttamiseen on höyrytaivuttaminen, jolloin puukappaletta pidetään tietty aika vesihöyryssä, jonka jälkeen puukappale on lyhyen aikaa taivutettavissa muottia vasten.

Puun höyrytaivuttaminen on ikivanha työstömenetelmä. Varhaisimmat merkit siitä ovat yli 5000 vuoden takaa Pohjois-Ruotsista saamelaisten suksien kärkien taivuttamisesta sekä Egyptiläisistä hieroglyfeistä ilmenneestä tuolien muotojen muokkauksesta (Navi & Sandberg 2012, 18, 250). Höyrytaivutusta on käytetty myös veneiden ja rakennusten osien muotoiluun. Perusperiaatteena on puun notkistaminen lämmöllä. Vesihöyry siirtää lämpöä puun soluihin mikä vaikuttaa niiden kemialliseen rakenteeseen notkistaen puun rakennetta ja mahdollistaen sen taivutuksen (Hill 2006, 101).

Lähdin tutkimaan kuinka puun höyrytaivuttamista voisi toteuttaa pienverstaalla. Eli ei kotioloissa eikä tehdashallissa, vaan noin 20-100 neliömetrin työtilassa melko pienillä kustannuksilla. Taivutuksen onnistumiseen vaikuttavia tekijöitä on lukuisia, mutta rajasin muuttuvat tekijät seuraaviin: kolme puulajia, kolme eri riman paksuutta ja eri höyrytys- sekä kuivumisaikoja. Höyrytaivutuslaitteiston rakentaminen ja testaus muodostivat myös ison osan koetta. Laitteiston rakentaminen ja koekappaleiden testaus on suoritettu Fuusiopajalla Helsingissä.

2. MENETELMÄ

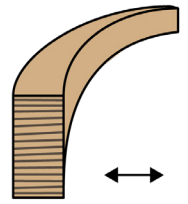
2.1. Tiedonkeruu

Pohjustavina tietoina haastattelin samalla työpajalla kanssani työskentelevää puuseppää, Ali Kantokorpea, sekä Aalto-yliopiston apulaisprofessoria ja puutekniikan tohtoria Lauri Rautkaria. Kantokorpi selvensi yleisiä perusteita puuriman sahauksen ja syysuunnan merkitykseen. Oletuksena on, että puun halkeamisen riski taivuttaessa minimoidaan, kun syysuunta on samansuuntainen taivutussuunnan kanssa (kuva 1).

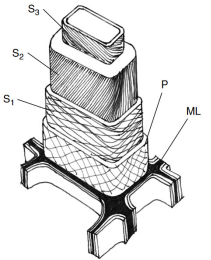
Rautkari avasi tietoa puun solurakenteen ja soluseinämäkerrosten merkityksestä. Puun rakenteessa on monia eri kerroksia, missä puun erilaiset solut ovat järjestäytyneet erisuuntaisesti. Solut koostuvat selluloosasta, hemiselluloosasta sekä ligniinistä. Soluissa on myös useampi seinämäkerros, joista paksuin on S2-kerros (kuva 2). Tässä kerroksessa on massaltaan eniten puun jäykkyyteen vaikuttavaa ligniiniä. Ligniinin lämmetessä se notkistuu ja näin puu muuttuu taipuisammaksi.

Esimerkkejä eri puulajien taivutettavuudesta ja taivutusmenetelmistä sain Jouko Pennasen TKK:n Tiedonanto 87:stä (2001) sekä Pariz Navin ja Dick Sandbergin kirjasta Thermo-Hydro-Mechanical Progressing Of Wood (2012).

Höyrytyslaitteiden ja -periaatteiden pohjustuksena tutkin aihetta myös videoista ja nettisivuilta. Kattava video löytyi aiheestakin kirjallisuutta julkasseelta Lon Schleiningilta.



Kuva 1. Taivutettavan puukappaleen syysuunta



Kuva 2. Puun solurakenne (Hill 2006, 23.)

2.2. Taivutuslaitteiston rakentaminen

Ennen kuin varsinaisia taivutustestejä pääsi kokeilemaan, täytyi siihen rakentaa toimiva laiteisto. Höyrytaivuttamiseen vaaditaan tila, jossa on vesihöyryä sekä muotti mitä vasten höyrytetty puukappale taivutetaan ja jätetään puristimilla jähmettymään.

Vesihöyryn lähde

Ensimmäiseksi tuli miettiä kuinka saisin aikaan vesihöyryä pidempiaikaisella syötöllä. Eri höyrytinratkaisuja tutkiessani löysin esimerkkejä kattiloista tai vedenkeittimistä muokatuista höyryttimistä, joista vesihöyry syötettiin putkella höyrytyskammioon. Suuremman skaalan höyryttimissä käytettiin kaasukäyttöisiä polttimia, joiden liekillä lämmitettiin suurempaa vesikammiota vesihöyryn tuottamiseksi. Näissä ratkaisuissa näytti kuitenkin olevan suurehkoja riskejä palo- ja sähköturvallisuuden kannalta, varsinkin pienemmän työtilan huomioiden.

Parhaaksi vesihöyryn lähteeksi valitsin seinätapettien irroitukseen tarkoitetun tapetinhöyrytimen. Se on yksinkertainen laite, jossa vesisäiliön vastukset kiehuttavat veden ja syntynyt vesihöyry ohjataan letkua pitkin neliskanttiseen suulakkeeseen. Irroitin suulakkeen ja vaihdoin letkun liittimen ilmanpaineletkun liittimeen, jolloin sen sai kytkettyä ja irroitettua höyrytyskammioon asennettuun vastakappaleeseen (kuva 3). Kyseisen höyryttimen kapasiteetti on 4 litraa ja se tuottaa höyryä kerrallaan reilun tunnin ajan, jonka jälkeen laitteen tulee antaa jäähtyä 5 minuuttia ennen uudelleen täyttöä. Kuumalla hanavedellä täytetty höyrytin alkoi tuottamaan vesihöyryä noin kymmenen minuuttia päällekytkemisestä ja sen jälkeen kammion lämpötila nousi tavoitteen vain parissa minuutissa. Kyseiset ajat tulee ottaa huomioon kappaleiden höyrytysaikoja ja niiden rytmitystä suunniteltaessa, ettei höyryn syöttö pääse katkeamaan kriittisellä hetkellä.



Kuva 3. Veden höyrytin, johto virtakytkimellä, letku ja sen liitin

Höyrytyskammio

Höyrytysprosessin voi tehdä avonaisessa tilassa, ohjaamalla vesihöyryä höyrytettävän kappaleen alle, mutta suljetulla kammiolla höyryn vaikutusta saadaan tehostettua. Tutkiessani videoita eri vaihtoehtoja höyrytyskammion rakenteeseen huomasin niiden yleensä olevan joko vanerista tai laudoista tehty laatikko tai esimerkiksi ilmastointiputksesta tehty tuubi. Höyrytyskammioiden päädyt ovat suljetut, mutta toinen pääty on avattavissa puukappaleiden syöttämistä ja poistamista varten. Vastakkaisesta päädyistä syötetään vesihöyryä kammioon. Kammion tulee olla hieman kallellaan, jotta sisälle kondensoitunut vesi pääsee valumaan matalammassa päädyssä olevasta poistoreiästä ulos. Kammion ei tarvitse, eikä saakaan, olla täysin tiivis, jotta höyry pääsee kiertämään sen sisällä vapaasti.

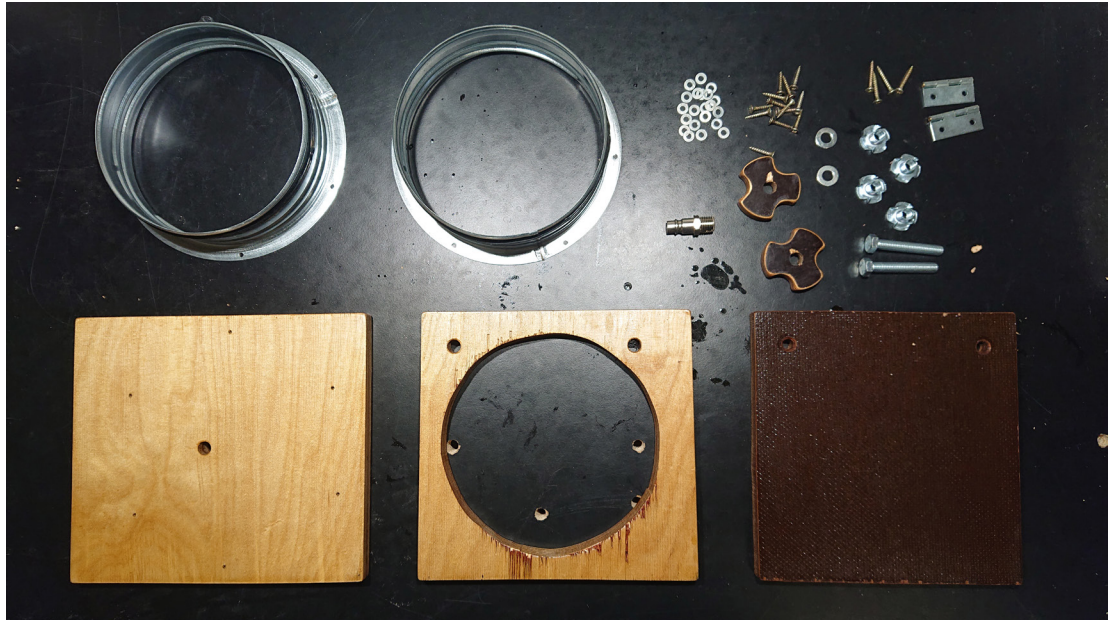
Päätin toteuttaa kammion rungon 160 mm halkaisijaltaan ja 115 cm pituisesta metallisesta ilmastointiputkesta. Tämä on valmiiksi reunoiltaan tiivis rakenne sekä siihen löytyi helposti seinä-kiinitykseen tarkoitetut päätypalat, joihin päätylevyt sai kiinnitettyä. Standardin mukaista ilmastointiputkea on myös myöhemmin mahdollista pidentää tarvittaessa toisella putkella ja liitospalalla. Päätylevyt tein aluksi melamiinipinnoitetusta lastulevystä. Ensimmäisen puolen tunnin koekäytön jälkeen kuitenkin huomasin, että vesi tunkeutui lastulevyrakenteen sisään ja turvotti päätylevyt reikäkohdista välittömästi käyttökelvottomiksi (kuvat 4 & 5).



Kuva 4. Turvonnut lastulevy liittimen päädyssä



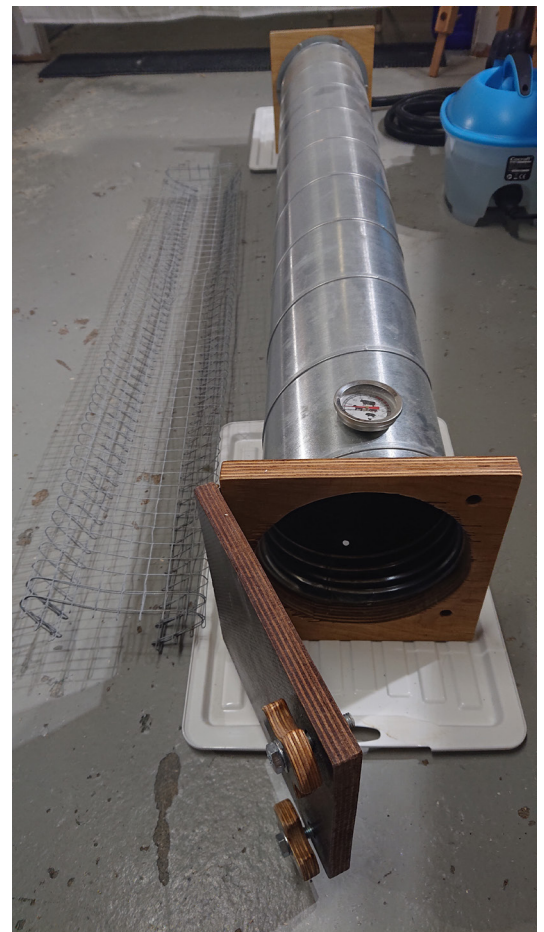
Kuva 5. Turvonnut lastulevy luukun päädyssä



Kuva 6. Höyrytyskammion komponentit (poislukien runkoputki)

Tein uudet versiot 18mm vanerista ja pintakäsittelin ne kolmella kerroksella Shooner Gold-lakkaa. Luukun kiinnitin toiselta laidalta saranoilla ja sulkemismekanismit tein kaksi kierrettävää nuppia joiden vastakierteet iiskumutereilla (kuva 6). Höyryttimen letkulle kiersin paineilmaletkun liittimen uroskappaleen. Lämpötilan seurantaan käytin perinteistä paistomittaria, jolle porasin reijän luukun päähän runkoa. Rungon sisälle tulee tehdä jonkinlainen teline höyrytettävälle kappaleille, jotta ne eivät makaa kammion pohjalla olevassa vedessä ja jotta höyry pääsee kiertämään kappaleet mahdollisimman tasaisesti. Tähän käytin kanaverkosta taivutettua ritilää (kuva 7).

Seuraavat höyrykammion käyttötestit toimivat hyvin. Osat tuntuivat kestävänsä lämpöä ja kosteutta. Höyrytyskammion sisälämpötilan tulisi olla 70 - 120 °C. Tätä korkeammat lämpötilat eivät ole tarpeen sillä ne alkavat haurastuttamaan puuta (Navi ym. 2012, 305). Laitteiston mittarin mukaan lämpötila saavutti 83 °C.

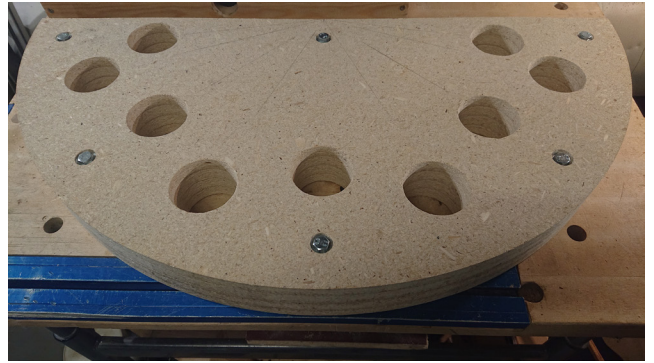


Kuva 7. Höyrytyslaitteisto kokoonpantuna. Sisälle tuleva ritila kuvassa vasemmalla

Taivutusmuotti

Höyrytetyt kappaleet tulee taivuttaa pikaisesti höyrytyksen jälkeen taivuttamalla ne haluttua muotoa vastaavaa muottia vasten. Koekäyttäessäni höyrytyskammiota laitoin sinne muutamat ylijäämäpuut testatakseeni toimintaperiaatetta ja taivutin nämä puukappaleet satunaisia puukappaleita vasten. Niiden teräviä kulmia vasten ei kuitenkaan saanut tasaista kaarta ja nämä esitestikappaleet halkesivat.

Tasaisen kaaren saamiseksi valitsin muotiksi alunperin viilutettujen polkupyörän lokasuojien puristukseen tarkoitetun muotin kaarevan sisäosan. Sen kaaren säde on 37cm ja se koostuu useasta koneellisesti jyrsitystä 14 mm paksusta MDF-levystä. Näin sitä oli helppo muokata taivutusmuotiksi sopivaksi ja kasata halutun levyiseksi, eikä muotin tasaisen kaaren saamiseksi tarvinnut nähdä suurta vaivaa. Porasin reikäsahalla neljään levyyn 9 reikää, joihin puristimien toisen päään voi asettaa. Yhdistin levyt toisiinsa pulteilla ja iskumuttereilla (kuva 8).



Kuva 8. Taivutusmuotti

Kuivumismuotit

Kun kappale on taivutettu taivutusmuottia vasten ja annettu olla siinä noin 15 minuuttia kunnes puun taipuisuusominaisuudet ovat lakanneet, tulee taivutettu kappale siirtää toiseen vastaavaan muottiin kuivumaan. Tässä muotissa kappaleita tulisi säilyttää 1-2 vuorokautta ylimääräisen kosteuden poistumiseksi. Rakensin kuivausmuotin lopuista lokasuojapuristimen sisäosan 12:sta levystä. Näihin porasin kuitenkin vähemmän reikiä puristimille ajan sekä työstömäärän säästämiseksi ja siksi ettei se vaadi puristimia yhtä tiheästi. Sen on tarkoitus vain säilyttää taivutetut kappaleet muodossaan (kuva 9).

Koska kappaleet tulisi jättää kuivumismuottiin ainakin noin vuorokaudeksi, eikä se tällöin ole käytettävissä seuraaville taivutuskappaleille, tein toiset kuivumismuotit polkupyörän vanteista, sillä näiden säde on lähellä alkuperäistä muottia. Näin sain koesarjojen testauskapasiteettia nostettua. Taivutetut kappaleet kiinnitin tarranauhahihnoilla (kuva 10).



Kuva 9. Kuivumismuotti 1

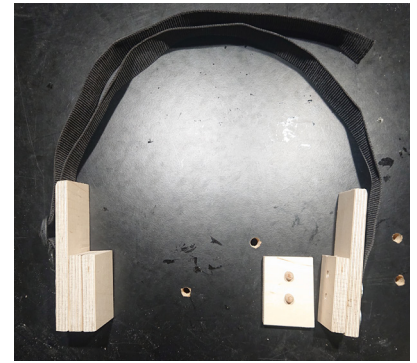


Kuva 10. Kuivumismuotit 2 & 3

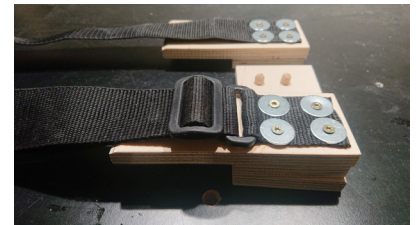
Taivutustalja

Höyrytaivuttamisessa käytetään yleensä apuna kappaleen ulkopinnalle asetettavaa metallivannetta. Menetelmän on kehitetty 1800-luvulla ja siitä jalostetut versiot ovat yleisesti käytössä teollisissa taivutustekniikoissa (Pennanen 2003, 13). Vanteen tarkoitus on tasoittaa taivutettavan kappaleen ulkopinnalle tulevaa venymää ja sisäpinnalle tulevaa painetta. Näin se ehkäisee ulkopuolelle syntyviä halkeamia. Vanteen päädyissa on vasteet, mitkä pitävät kappaleen paikoillaan.

Itselläni ei ollu saatavilla sopivan kokoista metalliluiskaa vanteen tekemiseen. Metallivanteen ongelma on myös se, että vanteen pituus ja päätypalojen leveys tulee rakentaa taivutettavan kappaleen mukaan. Itselläni ei kuitenkaan ollut tässä vaiheessa tiedossa kappaleiden tarkkaa kokoa, joten halusin tehdä siitä portaattomasti säädettävän. Metallivanteen sijaan kokeilin korvata vanteen taljalla minkä toinen pää on pujotettu silmukoiden läpi. Näin taljan pituus olisi säädettävissä samalla periaatteella kuin esimerkiksi repun olkahihna. Päätyvasteiden leveys tulisi myös olla lähellä taivutettavan kappaleen leveyttä. Esitesteissä taivutin taivutustaljalla päätyvastetta leveämpää kappaletta ja epätasainen paine kappaleen päädyssä aiheutti päätyyn murtuman. Tämän jälkeen tein päätyvasteisiin lisättävän kerroksen vasteen syventämiseksi leveämmille taivutuskappalaille (kuvat 11 & 12).



Kuva 11. Taivutustalja levennettävillä päätyvasteilla



Kuva 12. Taivutustaljan pituuden säätömekanismi

Valuma-astiat

Höyrytyskammiosta tihkuu vettä saumoistaan sekä pohjan valuma-aukosta, joten molempien päätyjen alle on hyvä asettaa laakeat astiat valumaveden keräämiseksi. Lisäksi niiden olisi hyvä olla hiukan eristyksissä lattiasta, sillä itselläni oli käytössä vain laatikon kannet, joiden läpi astiassa olevan veden lämpö alkoi tekemään kuplia lattiamaaliin.

Kustannukset

Suuntaa antavia kustannusarvioita höyrytyslaitteista: Tapettihöyrytin 40€, ilmastointiputki ja päätykiinnikkeet 35€, vanerilevyt 15€, pultit yms. pienrauta 20€, lämpömittari 5€, kanaverkko 5€. Yhteensä 120€. Lisäksi tarvitaan suuri määrä puristimia, muotit ja turvallisuusvälineet sekä tietenkin taivutettava materiaali.

2.3. Turvallisuushuomiot

Noin 100 °C vesihöyry on huomattavasti viileämpää kuin esimerkiksi 250 °C uuni, mutta vesihöyry sisältää uunin ilmaan nähden runsaasti enemmän partikkeleita, joten se siirtää lämpöä todella nopeasti ja voi aiheuttaa helposti palovammoja. Höyrytyksen ollessa käynnissä tulee käyttää lämmöltä eristäviä paksuja käsineitä. Pitkähihainen paita suojaa käsivarsia ja hihojen päädyt tulee olla kiinni, jottei höyry pääse hanskan ja hihan välistä hihan sisään, kuten itselleni kävi ensimmäisellä testikerralla. Höyrytyskammioista tulee luukun auetessa hönkäys vesihöyryä, joten kasvot tulee pitää pois luukun yläpuolelta. Suojalaseja on hyvä käyttää kuumien vesiroiskeiden sekä taivutushetkellä äkillisesti tapahtuvien muutosten varalta. Itse taivutusprosessi tapahtuu melko nopeasti ja siihen keskittyneesti, joten vaateuksissa ja työympäristössä ei tulisi olla takerutumiskohtia. Höyrytyskammio ei saisi kerätä painetta, mutta kyseinen tapetinhöyrytin on varustettu ylipaineventtiilillä, jotta paineen kertymistä ei pääse tapahtumaan.

2.4. Tutkittavat muuttujat

Muuttujien rajaaminen

Höyrytaivuttamisessa on useita lopputulokseen ja sen onnistumiseen vaikuttavia muuttuvia tekijöitä. Puukappaleissa vaikuttajat ovat puulaji, puun leikkuu, puun tasalaatuisuus, puukappaleen koko, puukappaleen kosteus ja onko se ilma- vai uunikuivattu. Lisäksi taivutukseen vaikuttavat höyrytys- ja kuivumisaika sekä kammion ilmanpaine. Muotilla on myös suuri merkitys, sillä se määrittää halutun taivutuksen voimakkuuden.

Itselläni oli aluksi tarkoitus testata muutamaa eri muottia ja useampaa eri kokoista kappaleita. Aikarajoitteiden vuoksi päätin kuitenkin rajata kappaleiden kokovaihtelua ja pysyä yhdessä muotin muodossa. Puun kosteudella on merkittävä vaikutus taipuisuuteen (Pennanen 2001). Itselläni ei kuitenkaan ollut puun kosteusmittaria käytettävissä, joten jätin tämän huomioimatta.

Päädyn siihen, että kaikki testikappaleet ovat 800 mm pitkiä ja 40 mm korkeita. Paksuuden vaikutuksen testaamiseksi sahasin rimat kolmeen eri paksuuteen: 5, 10 ja 20 mm. Halusin myös testata eri puulajien vaikutusta. Näiksi valikoitui kolme: haapa, koivu ja leppä (kuva 13). Lisäksi yhdeksi muuttuvaksi tekijäksi otin höyrytys- ja kuivimisajan vaihtelut.



Kuva 13. Testipalat sahattuna

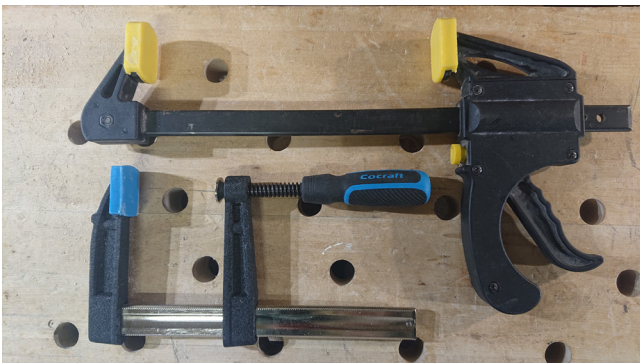
Ennakko-oletukset

Leppä ja koivu ovat rakenteeltaan melko kovia ja tiheitä puulajeja. Niiden kasvukerrokset ovat tasapaksuja, joten tasalaatuisuuden ansiosta niitä pitäisi pystyä taivuttamaan hyvin. Haapa luokitellaan solurakenteeltaan myös kovapuuksi, mutta on silti erittäin pehmeä ja rakenteeltaan väljä puulaji. Se ei yleensä ole niin tasalaatuisia, joten murtumat ovat todennäköisempiä. Myös muut poikkeamat kuten oksakohdat voivat lisätä murtumien todennäköisyyttä.

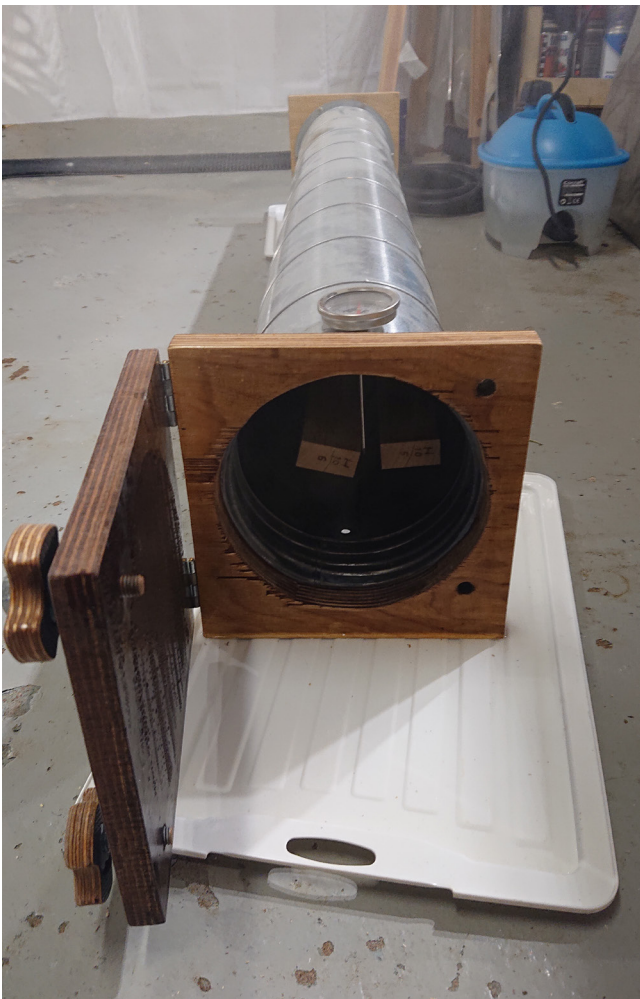
Höyrytysaikojen nyrkkisääntö on *tunti per tuuma*, eli tunnin höyrytys noin 25 mm paksuiselle kappaleelle ja siitä lineaarisesti skaalaten enemmän tai vähemmän (Schliening 2017). Tämän ohjearvon alittuessa on odotettavissa murtumia.

2.5. Taivutus käytännössä

Ensiksi säädetään taivutustaljan pituus höyrytettävän kappaleen mukaiseksi ja kiinnitetään sen toinen pää puristimella valmiiksi taivutusmuottiin. Puristimien pitää olla tarpeeksi avattuina taivutusmuotin lähettyvillä. Käytin puristimina vuoronperään kierrettäviä F-puristimia sekä nopeammin säädettäviä pikapuristimia (kuva 14). Kun höyrytyskammio on riittävissä lämpötilassa, asetetaan kappale ritilälle sen sisään ja annetaan olla siellä haluttu aika (kuva 15). Tämän jälkeen kappale poistetaan kammioista ja asetetaan ripeästi taivutusmuotin ja taivutustaljan päätyjen väliin (kuva 16). Sen jälkeen kappaletta taivutetaan tasaisesti vaakasuunnassa muottia vasten ja kiinnitetään puristimia sitä mukaa kuin mahdollista (kuvat 17 & 18). Noin 10 - 20 minuutin jälkeen kappale voidaan siirtää kuivumismuottiin (kuva 19) ja taivuttaa seuraava kappale.



Kuva 14. Puristintyyppit: Pikapuristin (yllä) sekä kierrettävä F-puristin (alla)



Kuva 15. Kappaleita höyrytyskammiossa



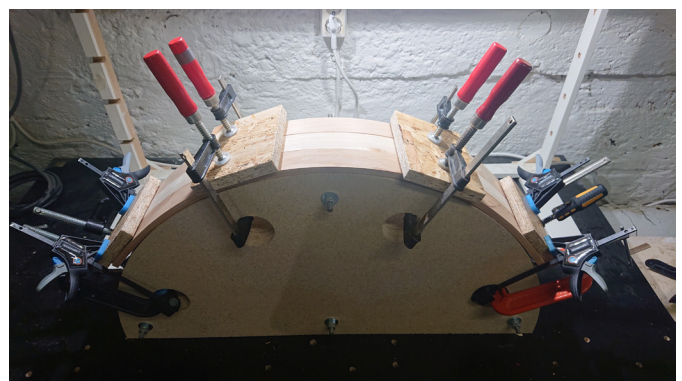
Kuva 16. Höyrytetty kappale taivutuksen alussa



Kuva 17. Kappaleen taivutus ja puristimien kiinnitystä



Kuva 18. Kappale taivutettuna



Kuva 19. Kappaleita kuivumismuotissa

3. TULOKSET

3.1. Muuttujat ja niiden merkintä

Tutkittavat muuttujat: puulaji, riman paksuus, höyrytys- ja kuivumisaika sekä takaisintaitto.

Tein jokaiseen kappaleeseen merkinnät seuraavasti:

Puulaji: K (koivu), H (haapa), L (leppä)

Riman paksuus: 5, 10, 20 (kaikkien kappaleiden muut mitat 800 x 40 mm)

Testierä: 1,2...7 (+A tai B jos testattu samoilla arvoilla. Jatkossa käytän testierästä merkintää T)

Tulostaulukko.

Taulukosta ilmenee testierä, kappale ja sen merkintä, höyrytysaika minuutteina, kuivumisaika vuorokausina, sisäkaaren säde takaisintaiton jälkeen senttimetreinä (muotin säde 37 cm) sekä merkittävimmät havainnot.

T	KAPPALE	H.AIKA	K.AIKA	SÄDE	HAVAINNOT
1	H5 1	15	1	62	runsaasti takaisintaittoa
1	K5 1	15	1	67	runsaasti takaisintaittoa
1	L5 1	15	1	62	runsaasti takaisintaittoa
3	H5 3	15	2	57	vähemmän takaisintaittoa
3	K5 3	15	2	57	vähemmän takaisintaittoa
3	L5 3	15	2	62	vähemmän takaisintaittoa
4	H5 4	15	2	42	vähemmän takaisintaittoa
4	K5 4A	15	2	57	vähemmän takaisintaittoa
4	K5 4B	15	2	57	vähemmän takaisintaittoa
4	L5 4A	15	2	57	vähemmän takaisintaittoa
4	L5 4B	15	2	57	vähemmän takaisintaittoa
2	H10 2	15	1	52	taipui siististi
2	K10 2A	15	1	52	halkei oksakohdista
2	K10 2B	15	1	52	taipui siististi
2	L10 2	15	1	52	taipui siististi
7	H10 7	15	2	47	taipui siististi
7	K10 7	15	2	52	taipui siististi
7	L10 7	15	2	47	taipui siististi
5	H20 5	25	2	42	ei taipunut päädyistä, sisäpainaumia
5	K20 5	25	2	42	ei taipunut loppuun ja murtui
5	L20 5	25	2	42	halkei useasta kohtaa taivuttaessa
6	H20 6	50	2	42	ei taipunut päädyistä, murtui, sisäpainaumia
6	L20 6	50	2	42	halkei taivuttaessa, sisäpainaumia

3.2. Testijärjestys

Lähdin liikkeelle kapeimmilla rimoilla (T1), jotta saisin ilman suurempaa voimankäyttöä laitteiston käytettävyyteen tuntumaa. T2 on toteutettu samoilla arvoilla, mutta 10 mm rimoilla. Ottaessani T1:n pois kuivumismuotista, huomasin siihen tulleen melko paljon *takaisintaittoa*, eli kappaleiden suoristumista muotista irrottamisen jälkeen (kuva 20). Täten päätin tehdä T3:sta saman kuin T1, mutta tuplasti pidemmällä kuivumisajalla.

Taivutuksissa joutui miettimään kuivumisaikojen rytmitystä. Kun kuivumismuotti oli varattu kahdeksi vuorokaudeksi T3:lle, päätin tehdä aiemmin mainitsemani lisäkuivumismuotit. Tähän koitin myös T4:ssä kahden 5 mm riman höyryttämistä ja taivuttamista samanaikaisesti päällekkäin (kuva 21).

Koska kappale K10 2A murtui oksakohdasta (kuva 22), päätin uusia testin toisella samankokoisella kappaleella, ja jättää kappaleen kuivumaan taivutusmuotiin sen ollessa silloin ainoana vapaana. Viimeisinä testierinä tein leveämmät palat, joiden annoin olla kuivumismuoteissa kaksi vuorokautta.



Kuva 20. Takaisintaittoa muotin kaarevuuteen nähden



Kuva 21. Kaksi samanaikaisesti höyrytettyä ja taivutettua kappaletta



Kuva 22. Murtuma oksakohdassa

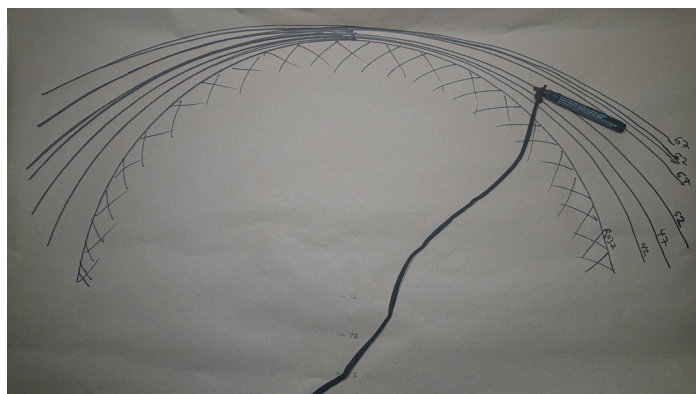
3.3. Tulosten havainnointia

Kaikki testikappaleen saatiin taipumaan (kuva 23). Havaittavia eroja syntyi takaisintaitossa, murtumissa ja sisäpainaumissa sekä taipumiseen vaaditusta voimasta.

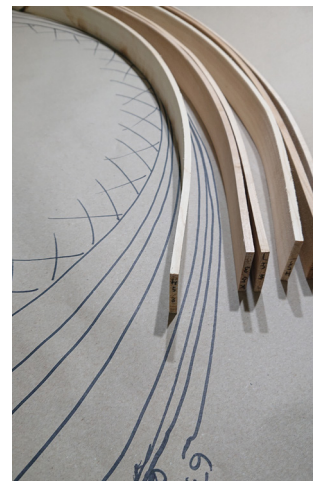
Taivutettujen kappaleiden säteiden mittaamiseen tein paperille suuntaa antavan asteikon eri säteille narun päähän sidotulla tussilla (kuva 24). Asettelin kappaleet asteikon päälle ja vertasin mikä 5 cm välein olevasta kaaresta oli lähimpänä kappaleen kaarta (kuvat 25 ja 26).



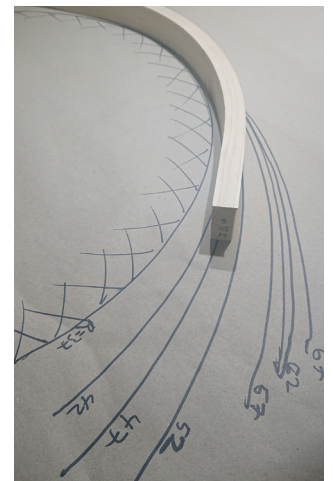
Kuva 23. Kaikki testikappaleet taivutettuina



Kuva 24. Mitta-asteikko säteen mittaamiseen



Kuva 25. Kappaleita mittauksessa



Kuva 26. Kappale mittauksessa

5 mm:n kappaleet olivat taipuisia jo ennen höyrytystä ja niiden taivuttaminen höyrytyksen jälkeen onnistui hyvin pienellä voimankäytöllä. 10 mm kappaleet tarvitsivat enemmän voimaa, mutta taipuivat loppuun saakka vaivatta. 20 mm kappaleita taivuttaessa täytyi jo alkaa käyttää koko varalon painoa. Osa kappaleista jäikin loppuosasta taipumatta, sillä mitä enemmän kappaletta taivuttaa, sitä vähemmän siinä on taivuttavaa vipuvartta jäljellä (kuvat 27 & 28). Haapa taipui muottia vasten parhaiten ja leppä huonoiten.

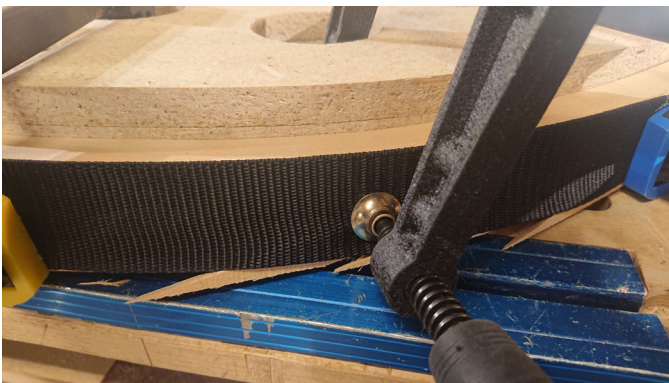
5 ja 10 mm kappaleissa ei ilmennyt murtumia, lukuunottamatta kappaletta K10 2A jossa oli oksakohta. 20 mm kappaleissa puolestaan esiintyi kaikissa sisäkaarten rypistymiä tai ulkokaaren murtumia (kuvat 29-34).



Kuva 27. Loppuun taipumaton kappale



Kuva 28. Loppuun taipumaton kappale



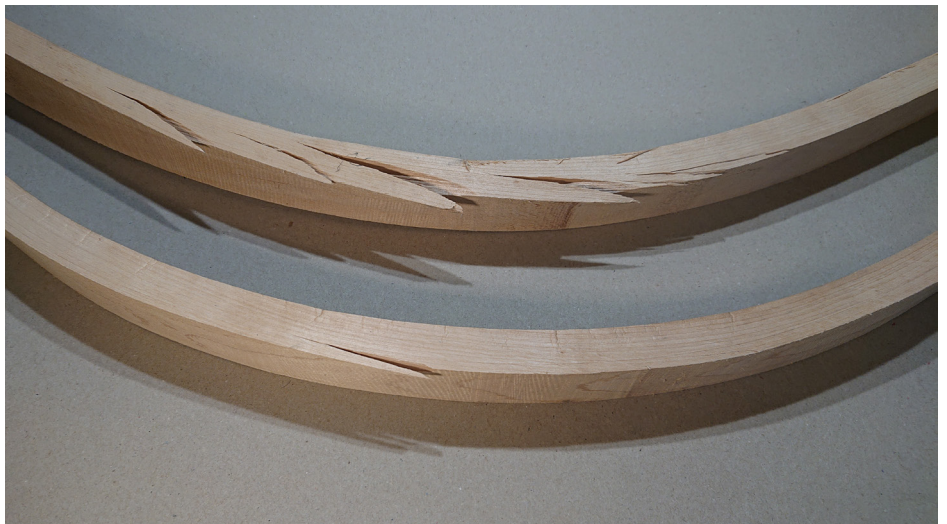
Kuva 29. Murtumia taivutusvaiheessa (L20 5)



Kuva 30. Murtumia (vas: H20 6)



Kuva 31. Murtumia taivutusvaiheessa (K20 5)



Kuva 32. Murtumia taivutusvaiheessa (ylä: L20 5, ala: L20 6)



Kuva 33. Sisäkaarten rypistymiä (K20 5)



Kuva 34. Sisäkaarten rypistymiä (ylä: H20 5, ala: H20 6)

4. JOHTOPÄÄTÖKSET

4.1. Testattujen muuttujien vaihtelut

Testierien sisällä oli joitain poikkeavuuksia, mutta niistä pystyi päättämään muutamia yhteneväisiä linjauksia:

- Kapeammat kappaleet taipuivat helpommin ja pienemmällä voimalla. Ne eivät kuitenkaan pitäneet muotoa läheskään yhtä hyvin kuin leveämmät. Kapeammat kappaleet säilyttivät kimmoisuutensa, joten molemmista päistä kiinnittäessä ne saa taitettua myös jyrkemmälle kaarelle.
- Leveimmät 20 mm:n kappaleet vaurioituivat sekä niiden taivuttaminen loppuun asti olisi vaatinut lisää voimaa. Tähän olisi voinut auttaa pidemmät höyrytysajat. Näiden kappaleiden muodostamat kaareteet kuitenkin säilyivät kaikkein jyrkimpinä.
- Parhaiten taipui ja piti muotonsa 10 mm:n kappaleet.
- Kuivumisajan nostaminen yhdestä kahteen vuorokauteen vähensti takaisintaittoa.
- Haapa taittui yllättävän hyvin ennako-oletuksiin nähden. Se oli helpoin taivuttaa muotoon, mutta siinä esiintyi takaisintaittoa hieman enemmän.
- Leppä oli kaikkein jäykin taivuttaa ja murtui useiten

4.2. Laitteiston toiminta ja parannukset

Höyrytaivutuslaitteisto toimi raakaversioiden muutostöiden jälkeen yllättävänkin hyvin. Useassa seikassa olisi kuitenkin vielä parannettavaa:

- Vedenhöyryttimen tunnin mittainen maksimikäyttöaika olisi hyvä olla pidempi paksummille kappaleille höyrynsyötön katkeamisen välttämiseksi.
- Höyrykammio saatiin tavoiteltuun lämpötilahaarukkaan, mutta kammion ulkopinnan eristämisen vaikutusta lämmön nousuun olisi mahdollista kokeilla.
- Valuma astiat olisivat saaneet olla korkeammat niiden tyhjentämisen helpottamiseksi sekä pohjastaan lattiasta lämpöeristetyt.
- Vesihöyry liuotti hieman vanerilevyjen lakkaa valumaveteen, mutta muutoksia vanerilevyjen kuntoon ei havaittu kovasta lämpö- ja kosteusrasituksesta huolimatta.
- Osa pienrautakomponenteista, kuten luukun suljinnappien pultit, alkoivat ruostua. Nämä olisi hyvä olla esimerkiksi ruostumatonta terästä.
- Taivutuskappaleiden määrän kapasiteetin nostamiseksi olisi hyvä olla useampi taivutusmuotti.
- Useampaa kappaletta samaan aikaan työstettäessä sisäverkossa olisi hyvä olla väliseinämiä, jotta siihen saisi useampia kappaleita kyljelleen höyrystymään.
- Taivutustalja piti vetolujuutensa yllättävän hyvin, eikä säätömekanismi antanut taljan lipsua. Metallivanteeseen verrattuuna talja pääsee kietymään herkemmin, mikä voi edesauttaa murtumien syntymistä. Lisäksi talja ei tasoita pienelle alalle kohdistuvaa painetta kuten metallivanne tekisi. Tämän takia kierrettävät F-puristimet jättivät kappaleisiin painaumuksia (kuva 35). Pidempi päätyvaste antaisi jäykempien kappaleiden loppuuntaivutukseen enemmän vipuvartta.

4.3. Testatun menetelmän ja materiaalitulosten hyödyntäminen

Puristimesta ja taivutusjäljestä syntynyt painauma (kuva 35) näyttää, että höyrytettyyn puuhun pystyisi prässäämään pintastruktuuria tai esimerkiksi valmistajan leiman.

Kyseistä menetelmää voi hyödyntää erilasiilla muoteilla valmistettaviin erikokoisiin kappaleisiin. Näitä voi käyttää esimerkiksi huonekaluissa, valaisimissa tai muissa koriste- ja käyttöesineissä. Myös perusmuotoja eri järjestyksessä yhdistelemällä voidaan luoda useita muotovaihtoehtoja (kuva. 36)



Kuva 35. Puristimesta ja taivutustaljasta prässätynyt kuvio



Kuva 36. Esimerkki samalla muotilla taivutettujen kappaleiden luomien muotojen monipuolisuudesta

5. LÄHDELUETTELO

Kirjallisuuslähteet:

Hill, C. 2006. Wood modification chemical, thermal and other processes. Chichester, Englan: John Wiley & Sons, Incorporated

Pennanen, J. 2001. Puun rakenteen, kosteuden ja lämpötilan vaikutus taipuisuuteen: Kokeellinen tutkimus. Tiedonanto 87 / Teknillinen korkeakoulu, puunjalostustekniikan osasto, puutekniikan laboratorio. Espoo: Teknillinen korkeakoulu

Haastattelut:

Kantokorpi Ali, puuseppä. 03.2021

Rautkari Lauri, puutekniikan tohtori. 03.2021

Kuvalähteet:

Kuva 1: Niilo Lehtonen

Kuva 2: Hill, C. 2006. Wood modification chemical, thermal and other processes. Chichester, Englan: John Wiley & Sons, Incorporated

Kuvat 3 - 36: Niilo Lehtonen

Videolähteet:

Schliening L, WOODEN. 2017. Wood Bending Made Simple, www.youtube.com/watch?v=QgtFN-TygKCY. 09.04.2021.